第 39 卷 第 1 期
2021 年 3 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 39, No. 1
Mar., 2021

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2021.01.07

北斗坐标框架精度估算方法研究

刘宇宸[1,3]，刘 利[2]，周善石[1]，徐君毅[2]，齐 巍[4]，胡小工[1]

(1. 中国科学院 上海天文台，上海 200030； 2. 北京卫星导航中心，北京 100094； 3. 中国科学院大学，北京 100049； 4.北京跟踪与通信技术研究所，北京 100094)

摘要： 从 RNSS (radio navigation satellite system) 米级服务角度给出了 BDCS (Beidou coordinate system) 实现精度估算方法，包括广播星历定位法、精密星历与广播星历比对法和卫星激光测距 (satellite laser ranging, SLR) 坐标估计法。广播星历定位法适用于用户对参考框架实现精度的实时监测，但监测精度受限于广播星历精度。轨道比对法引入了事后精密产品，监测精度较高，但其时效性相对较差。SLR 坐标估计法不受电离层延迟和卫星钟差影响，在三种方法中精度最高，但由于激光测距数据量较少，无法做短期监测。结果表明，三种方法估算 BDCS 与 ITRF 对齐精度均为厘米级。最后，在中俄卫星导航系统协作背景下，估算了 BDCS 和 PZ-90 对齐精度，结果表明，两者在厘米量级对齐，能够满足米级定位用户应用需求。随着北斗三号广播星历精度的提升和 SLR 的发展，上述三种方法的估算精度将会进一步提高。

关 键 词： 北斗坐标系；广播星历定位；卫星激光测距；精度监测

中图分类号： P228 **文献标识码：** A

1 引 言

国际地球参考框架 (international terrestrial reference frame, ITRF) 是国际地球参考系 (international terrestrial reference system, ITRS) 的实现，通过全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS)、甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI)、SLR 以及星载多普勒定轨和无线电定位 (doppler orbitography and radio-positioning integrated by satellite, DORIS) 四种空间大地测量技术建立和维持。2016 年 1 月 ITRF 发布最新版国际地球参考框架的 ITRF2014[1−3]。

不同的导航系统采用不同的空间基准。如 GPS 采用 WGS84 坐标系，GLONASS 采用 PZ-90 坐标系，Galileo 采用 GTRF 坐标系。为保证各卫星导航系统间的兼容和互操作，目前各导航系统参考框架采用向 ITRF 对齐的方式实现导航系统之间空间基准的一致性。对导

收稿日期： 2020-06-23； **修回日期：** 2020-08-10

资助项目： 国家自然科学基金 (41574029)

通讯作者： 刘利，lliu@shao.ac.cn

航系统参考框架的精度可以采用两种方法进行估算：(1) 利用地面站在两个参考框架的精密坐标之间直接计算转换参数；(2) 通过包含坐标框架信息的卫星轨道产品和定位结果间接监测估算框架对齐精度。对于导航系统供应商，一般采用第一种方法获得与 ITRF 对齐的精确估算。该方法需要参考框架实现过程中选用的监测站数据，而该数据一般用户不可获得。为实现对导航系统参考框架精度的监测，一般采用第二种方式，即通过广播星历等产品间接估算。两种方法的监测精度和时效性有所区别：前一种方法可实现毫米级精度估算，一般用于框架实现时的估算；第二种方法精度较第一种低，但更方便用户对参考框架精度进行监测和估算。本文重点分析第二种方法的估算精度，并利用实测数据对 BDCS 开展评估[4]。

北斗卫星导航系统的空间基准是北斗坐标系。北斗坐标系采用 120 余个分布于中国境内及全球的 GNSS 监测站观测数据并实现与 ITRF2014 的对齐。最新版北斗坐标系通过 IGS 监测站实现与 ITRF2014 对齐，对齐精度约为毫米级。

除导航系统公布的导航系统参考框架的精度，IGS 从用户角度也提供 GPS 空间基准的精度监测结果。IGS 通过比较 GPS 广播星历与 IGS 快速星历产品比从而计算 7 参数，实现对空间基准对齐精度监测，在一定程度上代表了 GPS 卫星对 RNSS 用户的空间基准传递精度[5−7]。

本文对上述方法的估算精度开展分析，同时结合 BDS-3 系统导航电文轨道精度较高以及所有卫星搭载激光角反射器的特点，给出广播星历定位方法以及 SLR 坐标方法开展对 BDS 空间基准传递精度进行估算。结合中俄空间基准互操作应用背景，利用 SLR 方法估算了 BDS 与 GLONASS 系统空间基准对齐精度，为导航系统兼容互操作应用提供支撑。

2 参考框架实现精度监测方法

2.1 广播星历定位法

广播星历定位法的处理采用固定广播星历卫星轨道和钟差，估算 GNSS 监测站每天一组位置参数、接收机各历元钟差、每 6 h 大气折射误差和相位模糊度。式 (1) 为观测方程：

$$\begin{cases} PC_i = \rho + c(t_\mathrm{r} + t_\mathrm{s}) + d_\mathrm{trop} + d_\mathrm{other} \quad , \\ LC_i = \rho + c(t_\mathrm{r} + t_\mathrm{s}) + d_\mathrm{trop} + \lambda_i + N_i + d_\mathrm{other} \quad , \end{cases} \tag{1}$$

式中，PC_i 为伪距无电离层组合值，LC_i 为相位无电离层组合值；ρ 为星地间几何距离；t_r 和 t_s 分别为接收机钟差和卫星钟差；d_trop 为对流层延迟；d_other 为其他误差项，如相对论效应，固体潮海潮改正以及多径噪声等；λ_i 为无电离层组合频率载波波长，N_i 为组合模糊度未知数；c 为光速，$c = 299\,792\,458\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$。为达到对导航系统空间基准传递实时监测估算的目的，广播星历定位法采用广播星历计算各历元卫星轨道和钟差。

利用 IGS 台站一天弧长观测数据估算坐标参数，解算出监测站在导航系统参考框架下的坐标。利用上述坐标及该监测站在 ITRF2014 框架下的坐标估算转换参数，即得到该参考

框架相对于 ITRF2014 的平移参数、旋转参数和尺度因子。7 参数转换公式如下：

$$X_{\mathrm{GNSS}} = X_{\mathrm{trans}} + (1 + X_{\mathrm{scale}}) \times X_{\mathrm{rot}} \times X_{\mathrm{ITRF}} \quad , \tag{2}$$

式中，X_{trans} 为平移参数；X_{rot} 为旋转参数；X_{scale} 为尺度因子；X_{GNSS} 为广播星历定位法得到的监测站坐标估计值；X_{ITRF} 为监测站在 ITRF2014 框架下的坐标。

2.2　星历比对法

广播星历空间基准为各导航系统参考框架，精密星历空间基准主要由 IGS 维持。目前 IGS 空间基准与 ITRF2014 一致，因此可以通过广播星历计算导航卫星的位置与精密星历进行比较，获得导航系统参考框架与 ITRF 的转换关系。由于 IGS 的精密轨道是卫星质心坐标，而广播星历为卫星天线相位中心位置，因此需要进行卫星天线相位中心到质心的改正。考虑到北斗不同类型卫星姿态控制模式不同，卫星天线相位中心修正具体如下。

(1) IGSO/MEO 卫星天线相位中心改正模型：

$$\boldsymbol{e_z} = -\frac{\boldsymbol{r}}{|\boldsymbol{r}|} \;,\quad \boldsymbol{e_y} = \boldsymbol{e_z} \times \frac{\boldsymbol{r}_{\mathbf{sun}} - \boldsymbol{r}}{|\boldsymbol{r}_{\mathbf{sun}} - \boldsymbol{r}|} \;,\quad \boldsymbol{e_x} = \boldsymbol{e_y} \times \boldsymbol{e_z} \quad , \tag{3}$$

其中，$\boldsymbol{r}$, $\boldsymbol{r}_{\mathbf{sun}}$ 为惯性系中卫星位置向量和太阳位置向量；$\boldsymbol{e_x}$, $\boldsymbol{e_y}$, $\boldsymbol{e_z}$ 为星固系到地固系的转换矩阵。

(2) GEO 卫星天线相位中心改正模型：

$$\boldsymbol{e_z} = -\frac{\boldsymbol{r}}{|\boldsymbol{r}|} \;,\quad \boldsymbol{e_y} = \boldsymbol{e_z} \times \frac{\boldsymbol{v}}{|\boldsymbol{v}|} \;,\quad \boldsymbol{e_x} = \boldsymbol{e_y} \times \boldsymbol{e_z} \quad , \tag{4}$$

其中，$\boldsymbol{r}$, $\boldsymbol{v}$ 为惯性系中卫星位置向量和速度向量。

相位中心改正模型为：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_{\mathrm{ciscts}} \times \begin{bmatrix} \boldsymbol{e_x} & \boldsymbol{e_y} & \boldsymbol{e_z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{\mathrm{phs}} \\ y_{\mathrm{phs}} \\ z_{\mathrm{phs}} \end{bmatrix} \quad , \tag{5}$$

其中，R_{ciscts} 为惯性系与地固系转换旋转矩阵，x_{phs}，y_{phs}，z_{phs} 为星固坐标系下卫星天线相位中心偏差，X, Y, Z 为卫星天线相位中心改正值。

归算到同一中心后，计算互差并进行 7 参数转换，即得到该参考框架对齐 ITRF 的平移参数、旋转参数和尺度因子。7 参数转换公式同公式 (2)。

2.3　SLR 坐标估算法

SLR 坐标估算法与广播星历定位法类似，通过将 SLR 台站在导航系统参考框架中的坐标与 ITRF 坐标进行比较，获得两个参考框架的转换参数。激光数据为地面站到卫星角反射器之间的测距，具有受电离层折射误差影响小、测量精度高、且不受钟差影响等特点。北斗三号卫星基于星间链路技术提供实时全球高精度广播星历产品，轨道精度高[8]。同时，北斗导航系统各卫星均配备了角反射器，因此可以采用广播星历轨道产品和 SLR 高精度测量数

据获得 SLR 台站在 BDCS 框架下的坐标。将该坐标与 SLR 台站在 ITRF 框架下的坐标进行比较，可获得两参考框架的转换参数[9,10]。

将广播星历计算的轨道由相心坐标改正至质心坐标，方法同上，并进行卫星质心改正。采用一个月观测弧长对 SLR 台站坐标进行估算，并将估算坐标与 ITRF2014 给出的当前时刻坐标进行比较，最后计算 7 参数，公式同 (2)。

基于中俄合作的背景，对伪距用户兼容互操作提出了要求。采用 SLR 坐标估计法对 BDSC 与 PZ-90 之间的转换 7 参数进行了比较。

下面给出不同参考框架之间的转换公式，以 BDCS 和 PZ-90 为例。由公式 (2) 可得到 PZ-90 与 ITRF 的转换公式：

$$X_{\mathrm{ITRF}} = X'_{\mathrm{trans}} + (1 + X'_{\mathrm{scale}}) \times X'_{\mathrm{rot}} \times X_{\mathrm{PZ-90}} \quad . \tag{6}$$

将公式 (6) 代入到公式 (2) 中，可得到：

$$\begin{aligned} X_{\mathrm{bdcs}} &= X_{\mathrm{trans}} + (1 + X_{\mathrm{scale}}) \times X_{\mathrm{rot}} \times (X'_{\mathrm{trans}} + (1 + X'_{\mathrm{scale}}) \times X'_{\mathrm{rot}} \times X_{\mathrm{PZ-90}}) \\ &= X''_{\mathrm{trans}} + (1 + X''_{\mathrm{scale}}) \times X''_{\mathrm{rot}} \times X_{\mathrm{PZ-90}} \quad . \end{aligned} \tag{7}$$

由此可得到 BDCS 和 PZ-90 的转换参数：

$$\begin{cases} X''_{\mathrm{trans}} = (1 + X_{\mathrm{scale}}) \times X_{\mathrm{rot}} \times X'_{\mathrm{trans}} + X_{\mathrm{trans}} \quad , \\ X''_{\mathrm{scale}} = X_{\mathrm{scale}} + X'_{\mathrm{scale}} + X'_{\mathrm{scale}} \times X_{\mathrm{scale}} \quad , \\ X''_{\mathrm{rot}} = X_{\mathrm{rot}} \times X'_{\mathrm{rot}} \quad . \end{cases} \tag{8}$$

3 BDCS实现精度监测

3.1 试验条件

本文试验需求的监测站需要具备稳定接收北斗三号 B1I/B3I 信号，且历元可用的北斗三号卫星至少4颗。经过筛选后选用 15 个台站数据，分别为境内站 wuh2, urum；境外站 tuva, zim2, ulab, arht, met3, savo, bor1, pove, ganp, moiu, sthl, pots, sgoc。表 1 为各站历元可用北斗三号卫星数量统计。图 1 为监测站站址分布图。

表 1 历元可视北斗三号卫星数量统计表

站名	可用北三卫星数	站名	可用北三卫星数	站名	可用北三卫星数
AHRT	7	POTS	6	TUVA	4
BOR1	4	POVE	5	ULAB	5
GANP	4	SAVO	5	URUM	6
MET3	7	SGOC	6	WUH2	5
MOIU	6	STHL	7	ZIM2	4

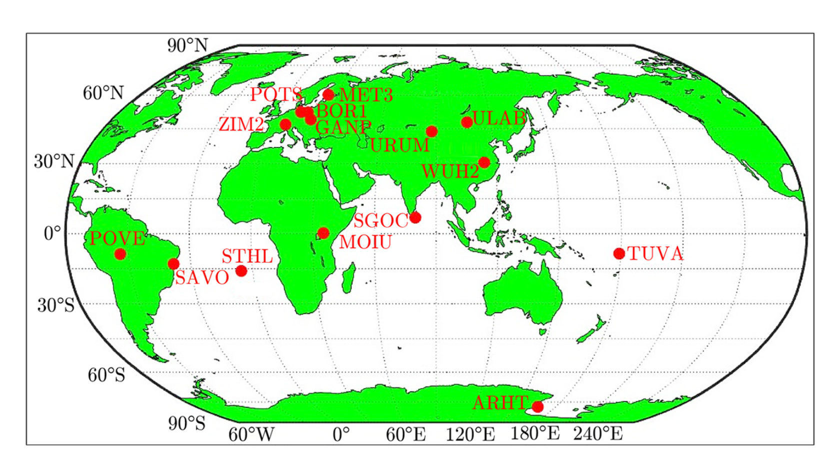


图 1　监测站站址分布

3.2　广播星历定位方法结果

采用 2019 年 1 月到 12 月全球监测站 BDS 卫星 B1/B3I 双频伪距相位 30 s 采样数据及广播星历，计算单天监测站坐标。统计了全年的坐标估计值与 ITRF 坐标互差，并每天计算一组 7 参数。

因为北斗三号卫星与北斗二号卫星空间信号精度存在差异，所以我们仅对北斗三号卫星与北斗二号、三号联合两种处理策略相比较。第一种全部使用北斗三号卫星，为 C19-C37，采用 B1I/B3I 双频组合；第二种采用北斗二号/北斗三号混合星座，为 C01-C37，其中北斗二号采用 B1I/B3I 和 B1I/B2I 双频组合，北斗三号为 B1I/B3I 双频组合。

北斗三号处理各站 2019 年全年的坐标估计值与 ITRF 互差序列的统计结果，见表 2。

表 2　北斗三号广播星历定位坐标互差

站名	编号	E 方向/cm		N 方向/cm		U 方向/cm	
		均值	方差	均值	方差	均值	方差
MET3	10503010	−3.07	1.86	−17.91	1.14	4.66	3.61
GANP	11515001	0.82	2.97	0.90	0.92	−7.31	3.52
BOR1	12205002	1.28	3.08	0.65	1.38	−7.75	4.69
ZIM2	14001008	1.07	3.31	0.12	1.12	−9.00	5.29
POTS	14106003	−0.22	2.05	1.70	1.10	−14.45	3.99
WUH2	21602007	−0.06	1.34	1.14	0.48	−2.22	2.48
URUM	21612001	−0.28	1.39	1.35	0.31	2.26	2.41
SGOC	23501003	−4.30	2.02	0.10	0.35	−5.00	3.45
ULAB	24201001	−1.23	1.43	1.60	0.49	−2.80	2.18
STHL	30606003	−6.88	2.85	−1.17	0.74	8.42	4.41
MOIU	33204001	−4.75	1.70	−0.39	0.40	4.87	2.60
TUVA	51101001	−1.61	32.61	−1.25	3.13	5.44	16.91
ARHT	66001005	3.12	1.53	−2.31	1.02	4.68	5.54
SAVO	93235000	−4.98	2.75	0.42	0.44	−5.13	3.46
POVE	93780000	−3.70	3.60	0.43	0.50	−4.92	4.12

我们利用 2019 年 2 月北斗三号数据，通过广播星历定位法扣除卫星钟差、接收机钟差、大气延迟以及相位模糊度等误差，并得到 O−C 时间序列，结果如图 2 所示，其平均残差在 −0.2 ∼ 0.2 m 之间。

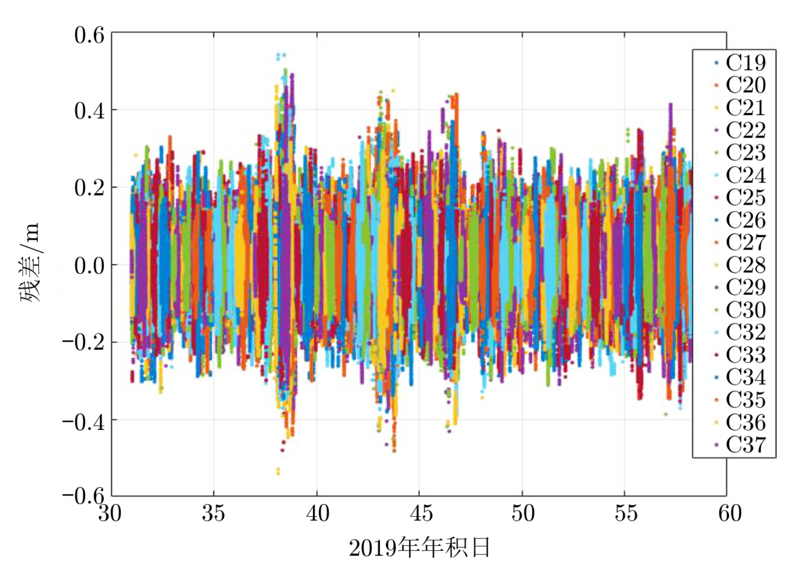
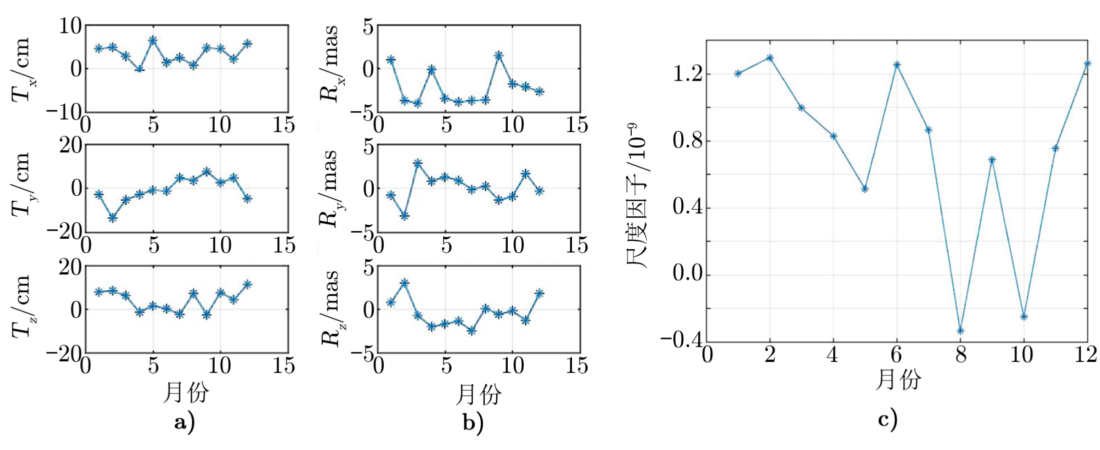


图 2 北斗三号广播星历定位法残差序列

表 3、图 3 给出了北斗三号广播星历定位法的转换 7 参数结果。

表 3 北斗三号广播星历定位法 7 参数结果

	T_x/cm	T_y/cm	T_z/cm	R_x/mas	R_y/mas	R_z/mas	尺度因子/10^{-9}
参数	3.3	−0.7	3.9	−2.19	0.08	−0.43	0.76
中误差	2.0	5.6	4.5	1.88	1.52	1.54	0.53



注：a) 平移参数；b) 旋转参数；c) 尺度因子。

图 3 北斗三号广播星历定位法得到的平移参数、旋转参数和尺度因子随时间的变化

北斗二号/三号联合处理各站 2019 年全年的坐标值与 ITRF 互差序列见表 4。

表 4　北斗二号/三号联合广播星历定位坐标互差

站名	编号	E 方向/cm		N 方向/cm		U 方向/cm	
		均值	方差	均值	方差	均值	方差
MET3	10503010	−1.47	0.94	−5.16	0.90	5.25	3.45
GANP	11515001	−1.28	2.06	8.90	6.96	−9.63	7.31
BOR1	12205002	−4.90	6.61	5.66	3.15	−8.02	2.22
ZIM2	14001008	−6.12	7.42	5.40	3.39	−8.77	5.74
POTS	14106003	0.21	0.85	2.66	0.63	−9.27	5.56
WUH2	21602007	2.14	0.97	2.72	0.81	−4.53	7.64
URUM	21612001	2.84	1.04	3.21	0.61	9.18	10.09
SGOC	23501003	−2.75	1.10	−1.49	0.79	−20.93	9.36
ULAB	24201001	0.67	1.44	3.12	0.72	10.75	11.41
STHL	30606003	1.20	2.92	0.43	0.44	5.86	6.73
MOIU	33204001	−1.47	1.02	−0.46	0.55	8.65	9.07
TUVA	51101001	5.48	3.88	6.66	1.73	−16.51	7.38
ARHT	66001005	5.13	3.18	−5.00	5.33	12.36	5.73
SAVO	93235000	−7.05	4.72	1.87	6.30	−8.85	8.96
POVE	93780000	−5.55	2.65	−2.43	3.66	−7.24	5.36

我们利用 2019 年 2 月北斗二号/三号数据，通过广播星历定位法扣除卫星钟差、接收机钟差、大气延迟以及相位模糊度等误差，并得到 O−C 时间序列，结果如图 4 所示，北斗三号平均残差在 −0.5 ∼ 0.5 m 之间，北斗二号平均残差在 −0.7 ∼ 0.7 m 之间。

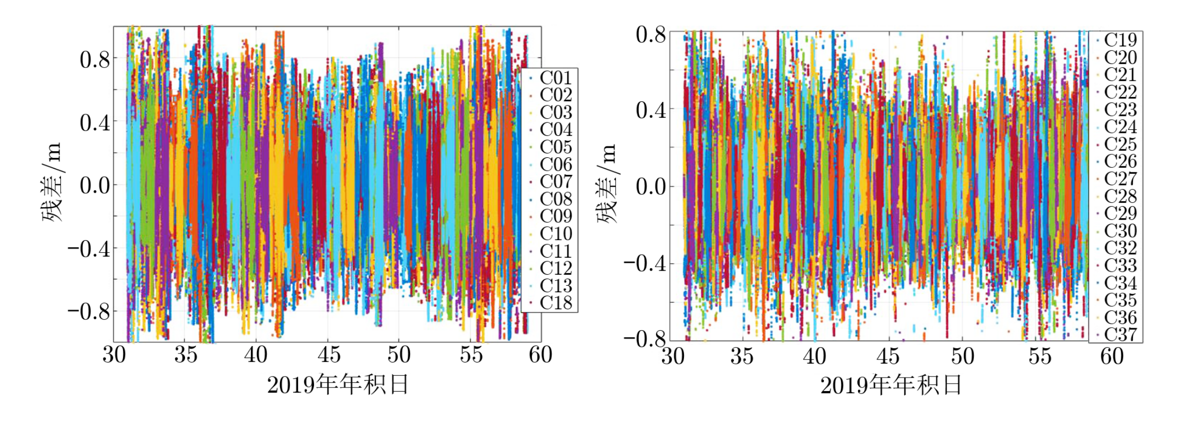
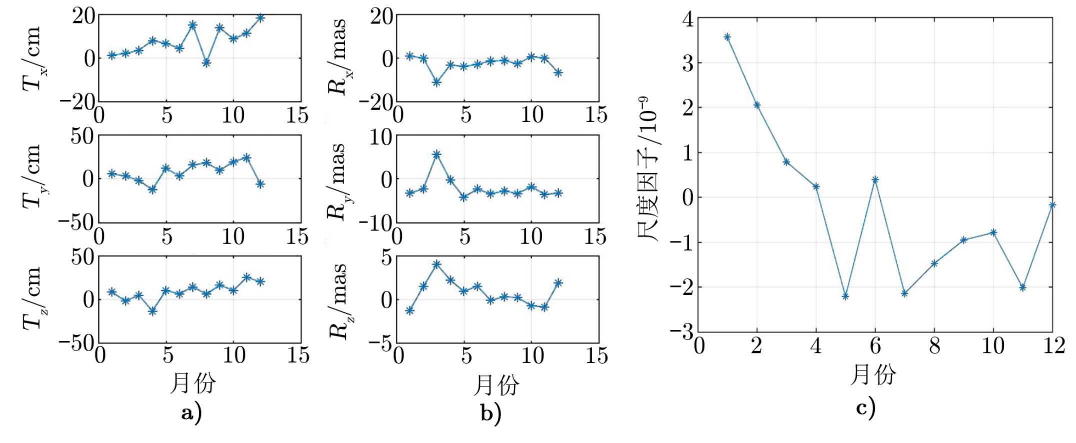


图 4　北斗二号/三号卫星定位法北二/三卫星残差序列

由于北斗二号是区域服务系统，没有境外观测和注入，因此进行全球评估时采用的是北斗二号长期预报产品。而北斗三号使用星间链路观测，地面站结合星地星间数据联合定轨，其轨道精度较高。因此相对于北斗二号，北斗三号卫星空间信号精度较高，见表 5 及图 5。

表 5　北斗二号/三号联合广播星历定位法 7 参数结果

	T_x/cm	T_y/cm	T_z/cm	R_x/mas	R_y/mas	R_z/mas	尺度因子/10^{-9}
参数	7.5	7.3	8.5	−2.65	−2.14	0.76	−0.23
中误差	5.9	9.6	9.7	3.33	2.52	1.45	1.69



注：a) 平移参数；b) 旋转参数；c) 尺度因子。

图 5　联合广播星历定位法得到的平移参数、旋转参数和尺度因子随时间的变化

3.3　星历比对法结果

采用 2019 年 1 月 3 日到 1 月 27 日总计 25 d 的精密星历及广播星历，精密星历为中国科学院上海天文台事后处理精密星历。将广播星历与精密星历相拟合可计算出卫星在 BDCS 框架下和 ITRF 框架下的坐标，并统计 25 d 的坐标互差，每天计算一组 7 参数。

将上海天文台北斗事后精密星历与广播星历进行比较，计算单天 7 参数，并计算一个月平均值，结果如表 6 及图 6 所示。

表 6 BDS广播星历与精密星历 7 参数结果

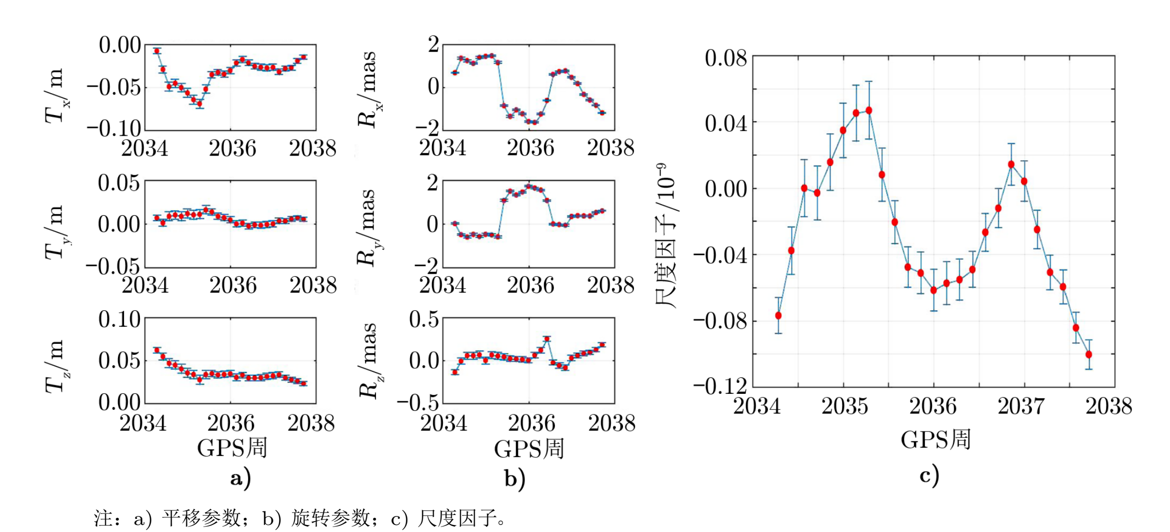
	T_x/cm	T_y/cm	T_z/cm	R_x/mas	R_y/mas	R_z/mas	尺度因子/10^{-9}
参数	−3.4	0.5	3.5	0.01	0.40	0.04	−0.026
中误差	1.6	0.5	0.9	1.10	0.81	0.08	0.04

3.4　SLR 坐标估算法结果

采用 SLR 测量数据以及广播星历，分别计算 BDS 和 GLONASS 系统的 SLR 台站坐标，结果见表 7, 8。对于 BDS 结果，4 颗北斗三号卫星，共 3 330 个标准点数据；对于 GLONASS 结果，21 颗在轨卫星，共 4 317 个标准点数据。

我们采用 SLR 估算法解得 2019 年全年的残差时间序列 (见图 7)，表明该方法下 BDS 的空间信号精度的残差在 −0.15 ∼ 0.15 m 范围内。

采用 SLR 测量数据以及广播星历，计算 SLR 台站坐标。数据为 2019 年 BDS 全年 ILRS 激光联测数据，由于 SLR 数据采样较少，一个月估计一组台站坐标，计算了 BDCS



注：a) 平移参数；b) 旋转参数；c) 尺度因子。

图 6　星历比对法得到的平移参数、旋转参数和尺度因子随时间的变化

表 7　GLONASS SLR 坐标估计互差

编号	E方向/cm		N方向/cm		U方向/cm	
	均值	方差	均值	方差	均值	方差
18685901	5.27	1.30	−5.97	1.24	−13.72	1.07
78393402	−3.81	2.05	−0.12	2.25	−9.23	1.58
78403501	5.44	1.71	−0.88	1.63	−8.35	1.39
78418701	−2.55	4.67	0.31	3.86	−9.41	2.64
72496102	11.71	2.80	−2.53	2.29	−14.27	2.06
78212801	2.86	2.25	−9.07	1.88	−3.84	1.61
18799401	−0.63	2.56	−1.52	3.14	−5.92	2.07
18734901	−11.83	6.50	−6.70	6.77	−7.01	4.75
18879701	3.54	10.45	−7.85	16.06	−8.13	11.8
70900513	3.49	1.22	−10.55	1.31	−1.14	0.92
18900901	−0.16	5.38	−16.03	4.40	−6.23	4.51
78259001	−10.64	2.69	−2.08	3.09	18.34	2.10
75010602	257.90	5.55	−152.46	5.71	−94.33	7.95
71240802	−256.41	5.55	−152.46	5.71	−94.33	7.95
79417701	11.00	2.65	3.65	3.79	−12.62	2.19
78457801	−13.33	2.62	−1.39	2.34	−5.42	2.22
71050725	58.13	3.28	−228.27	3.43	187.27	3.18
71100412	17.98	6.28	4.52	3.94	−15.29	3.67

表 8 2019 年 BDS SLR 坐标估计互差

编号	E方向/cm		N方向/cm		U方向/cm	
	均值	方差	均值	方差	均值	方差
70900513	−6.73	5.09	−2.20	8.78	−3.49	7.09
78457801	4.64	5.40	−1.23	3.71	3.07	6.76
78393402	1.90	15.17	0.32	12.86	−8.45	15.12
78403501	2.33	6.43	−0.33	3.33	2.06	8.03
88341001	1.77	4.30	4.37	7.78	6.51	5.42
71100412	−4.18	19.95	6.89	18.30	3.73	17.69
72496102	4.22	9.45	11.50	15.74	−3.37	16.62

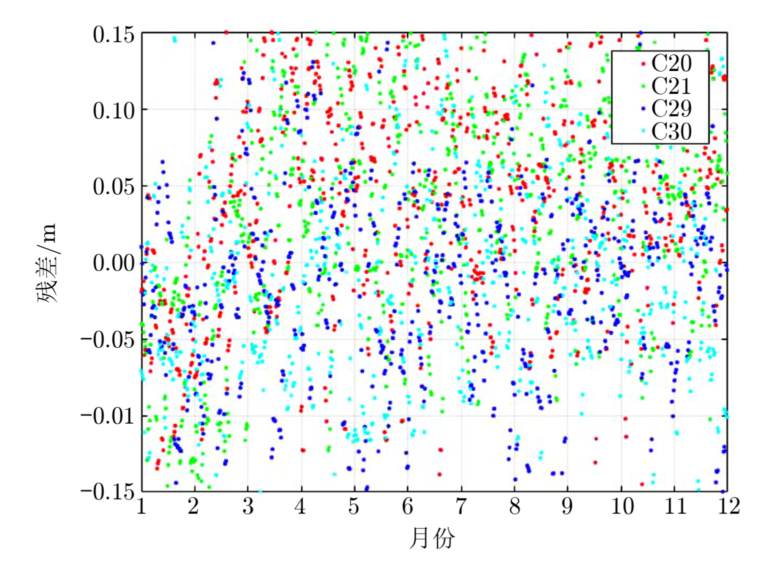
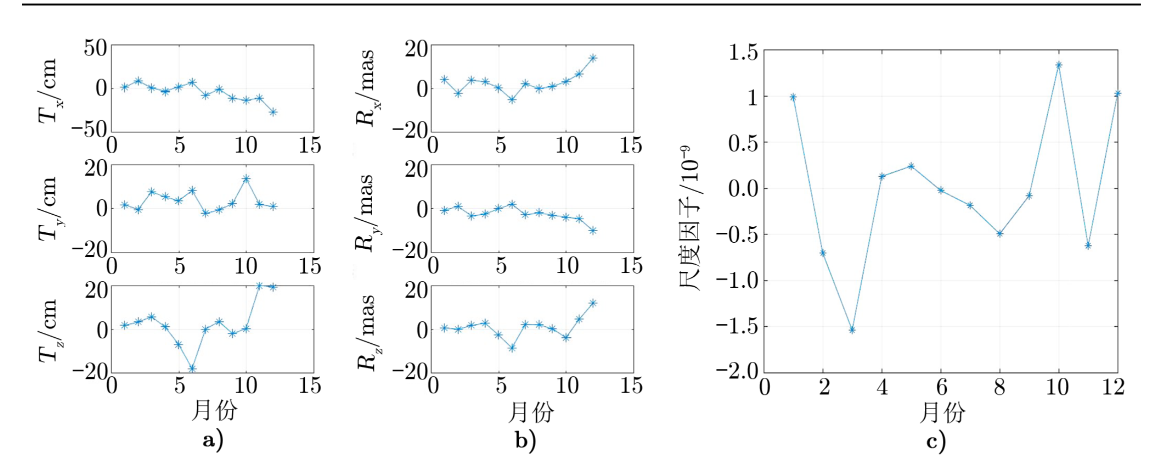


图 7 SLR 坐标估算法残差序列

与 ITRF 之间的转换 7 参数。此外，采用 GLONASS 2019 年 1 月 ILRS 激光联测数据，计算了 PZ-90 与 ITRF，以及 BDCS 与 PZ-90 之间的转换 7 参数，结果见表 9 及图 8。

表 9 SLR 坐标估算法 7 参数结果

		T_x/cm	T_y/cm	T_z/cm	R_x/mas	R_y/mas	R_z/mas	尺度因子/10^{-9}
BDS	参数	−4.8	3.4	2.2	2.46	−2.60	0.78	0.004
	中误差	9.6	4.3	9.8	4.52	2.99	4.72	0.79
GlONASS	参数	−0.045	1.6	−1.2	−1.31	−0.99	−0.94	−1.802
	中误差	2.1	2.1	2.0	0.78	0.71	0.87	0.3
BDS-GLONASS	参数	−0.3	1.7	−6.5	−4.51	0.01	−0.85	−2.786
	中误差	5.7	5.4	5.2	1.91	2.05	2.24	0.8



注：a) 平移参数；b) 旋转参数；c) 尺度因子。

图 8　SLR 坐标估算法得到的平移参数、旋转参数和尺度因子随时间的变化

3.5　结果分析

本文采用广播星历定位法、广播星历与精密星历比较以及 SLR 台站坐标估算三种方法对 BDCS 实现精度进行计算。第一种方法分别用北斗二号、北斗三号混合星座和北斗三号进行精密坐标估算。北斗三号 7 参数转换结果平移参数为 3.3 cm, −0.7 cm, 3.9 cm；旋转参数为 −2.19 mas, 0.08 mas, −0.43 mas；尺度因子为 7.6×10^{-13}。北斗二号和北斗三号混合星座 7 参数转换结果平移参数为 7.5 cm, 7.3 cm, 8.5 cm；旋转参数为 −2.65 mas, −2.14 mas, 0.76 mas；尺度因子为 -2.3×10^{-10}。

第二种方法将广播星历与精密星历进行比较。转换结果平移参数为 −3.4 cm, 0.5 cm, 3.5 cm；旋转参数为 0.01 mas, 0.4 mas, 0.04 mas；尺度因子为 -2.6×10^{-11}。

第三种方法采用精密星历和 SLR 数据计算台站坐标。BDS 转换结果平移参数为 −4.8 cm, 3.4 cm, 2.2 cm；旋转参数为 2.5 mas, −2.6 mas, 0.8 mas；尺度因子为 4×10^{-12}。GLONASS 转换结果平移参数为 −0.045 cm, 1.6 cm, −1.2 cm；旋转参数为 −1.31 mas, −0.99 mas, −0.94 mas；尺度因子为 -1.802×10^{-9}。

BDS 与 GLONASS 转换结果平移参数为 −0.3 cm, 1.7 cm, −6.5 cm；旋转参数为 −4.51 mas, 0.01 mas, −0.85 mas；尺度因子为 -2.786×10^{-9}。

通过上述计算结果可以看出，三种方法计算的 7 参数的形式误差均在厘米量级，因此 BDCS 与 ITRF 对齐精度在厘米量级。

对比上述三种方法，由于星历比对法和 SLR 坐标估算法引入了事后精密产品，监测精度比广播星历定位法高。北斗卫星广播星历包含轨道误差、PCO 误差等，因此所得精度不高，会对参考框架实现精度监测造成一定的影响，但随着广播星历精度的提高，其监测精度也会逐渐提高。

4 总　结

本文分别给出了三种方法来对 BDCS 的实现精度进行计算，并采用了 2019 年全年的数据进行试验，结论如下。

(1) 通过上述三种方法对实测数据进行计算，均可满足 RNSS 米级用户兼容互操作的需求。广播星历定位法可以进行参考框架的实时监测，但广播星历精度决定了监测精度；轨道比对法通过引入事后精密产品来提高监测精度，但时效性不强；SLR 坐标估算法所得的精度是三种方法中最高的，但目前激光联测数据量较少，因此只能进行长期的监测结果分析。

(2) 本文所选取的 IGS 站均需能够接收到北斗三号卫星 B1I/B3I 频点，因此未选取太多站参与本次试验。北斗二号和北斗三号联合处理的方法与仅北斗三号处理的结果在厘米量级一致，因此在后续的工作中，可以加入更多以 IGS 核心站为主的地面监测站进行全球网解计算，以进行参考框架监测，有助于监测结果的可靠性。

参考文献：

[1] National Geospatial-intelligence Agency (NGA). Standardization Document Department of Defense, US: NGA, 2014

[2] Stephen M, Robert W, Scott A. True, The WGS 84 Terrestrial Reference Frame in 2016, Russia: ICG, 2016: 1

[3] Gusev I. New Transformation Parameters at Epoch 2010.0 from PZ-09.11 to ITRF2014, 西安: ICG, 2018: 5

[4] 赵立谦, 胡小工, 周善石, 等. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(10): 1501

[5] Werner E. Galileo Terrestrial Reference Frame(GTRF)-Status, 西安: ICG2018

[6] Liu Li, Xu Junyi, Zhou Shanshi,et al. Update on the BeiDou Coordinate System(BDCS), 2019: 2

[7] 魏子卿, 吴富梅, 刘光明. 测绘学报, 2019, 48(07): 805

[8] Tang C, Hu X, Zhou S. Advances in Space Research, 2016, 58(7): 1390

[9] 赵群河, 王小亚, 何冰, 等. 测绘学报, 2015, 44(04): 370

[10] 赵罡, 王小亚, 吴斌. 测绘学报, 2012, 41(02): 165

Research on Accuracy Evaluation Method of Beidou Coordinate Frame

LIU Yu-chen[1,3], LIU Li[2], ZHOU Shan-shi[1], XU Jun-yi[2], QI Wei[4], HU Xiao-gong[1]

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Shanghai 200030, China; 2.Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology,

Beijing 100094, China)

Abstract: From the perspective of RNSS meter-level services, BDCS implementation accuracy evaluation methods are given, including broadcast ephemeris positioning method, precise ephemeris and broadcast ephemeris comparison method, and satellite laser ranging (Satellite Laser Ranging, SLR) coordinate estimation method. The broadcast ephemeris positioning method is suitable for users to realize real-time monitoring of the accuracy of the reference frame, but the monitoring accuracy is limited by the accuracy of the broadcast ephemeris. The orbital comparison method introduces post-precision products with high monitoring accuracy, but its timeliness is relatively poor. The SLR coordinate estimation method is less affected by the ionospheric delay and is not affected by satellite clock errors. It has the highest accuracy among the three methods. However, due to the small amount of laser data, it cannot be used for short-term monitoring. The results show that the accuracy of the three methods to evaluate the alignment of BDCS and ITRF is at the centimeter level. Finally, in the context of Sino-Russian satellite navigation system cooperation, the alignment accuracy of BDCS and PZ90 was evaluated. The results show that the two are aligned on the centimeter level, which can meet the application requirements of meter-level positioning users. With the improvement of Beidou-3 broadcast ephemeris accuracy and the development of SLR, the evaluation accuracy of the above three methods will be further improved.

Key words: BDCS; broadcast ephemeris positioning; SLR; accuracy monitoring